

GPS 時刻同期型 MEMS センサの橋梁モニタリングへの適用

筑波大学大学院システム情報工学研究科 学生会員 ○毛利 宏輔
 筑波大学システム情報系 正会員 山本 亨輔
 筑波大学大学院システム情報工学研究科 学生会員 浅川 一樹

1. 研究背景

橋梁振動分析の精度改善には、多点計測が有効である。しかし、課題として省力化が挙げられる。そこで GPS 時刻同期を用いた MEMS (Micro Electro Mechanical Systems : マイクロマシン) センサを開発する。そして、この MEMS センサにより得られた実橋梁計測データに SVD (Singular Value Decomposition : 特異値分解) 法を適用することで、橋梁モニタリングへの適用性を検証する。

2. 信号分析の理論

2.1 SVD 法

橋梁の多点計測により得られた振動応答のデータを特異値分解することにより、モード形状の推定を行う。任意の $n \times m$ 行列 D は、

$$D = U \Sigma V^T \tag{1}$$

の形に分解される。ここで $U \in R^{n \times n}$ および $V \in R^{m \times m}$ は直行行列である。また、 $\Sigma \in R^{n \times m}$ は次式のような、一般化された対角行列である。

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \Sigma_1 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & \dots & \Sigma_n & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} = [\Sigma_R \quad 0] \tag{2}$$

ただし、 $\Sigma \in R^{n \times m}$ は行列 Σ の第 n 列までを取り出した対角行列である。また、対角要素 $\Sigma_1, \dots, \Sigma_n$ は特異値で大きいものから順に並んでいるものとする^{[1][2]}。

2.2 橋梁システムのモード解析と SVD 法

多点計測で得られた振動応答データを

$$Y = [y(t_0) \ y(t_1) \ \dots \ y(t_N)] \tag{3}$$

と行列化する。SVD 法を適用すると、式(5)のようにモード形状 A と基準座標データ Q の推定値が得られる。

$$Y = U \Sigma V^T = A Q \tag{4}$$

SVD 法では、基準座標である $Q (= \Sigma V^T)$ の無相関性が成り立つとき、正確にモード分解が可能である。



図1 MEMS センサ外観

3. MEMS センサの開発

3.1 MEMS センサの満たすべき性能

本研究での対象橋梁は中小スパン橋とした。これは、橋梁全体の 80% を占めるのが中小スパン橋だからである。また、中小スパン橋は交通振動の影響を強く受ける。生じる交通振動は、乗用車によるものから大型車によるものまで振幅は幅広い。したがって、対象とするレンジも広範囲をカバーする必要がある。大きな振動のみを対象とすると、小さな振動が正確に捉えきれない可能性がある。よって、高い分解能を持つ AD コンバータを実装することが有効である。

独立した MEMS センサを同期する方法として GPS 時刻同期を採用した。無線通信での時刻同期は労力面で理想的であるが、通行する車両などが障害物となりデータ欠損が生じやすい。したがって本研究では、各センサで取得したデータを計測終了後にソフト上で時刻同期を行った。

3.2 MEMS センサのシステム構成

MEMS センサによる橋梁振動計測の普及を促す目的から、全ての部品は規格化された市販品を用いる。開発した MEMS センサを図1に示す。AD コンバータには分解能が 24bit である ADS1220 を採用した。これは、3.1 で述べたように、大きな振動を対象にしつつ、小さな振動をとらえるための高分解能の AD コンバータである。また、GPS モジュールは Adafruit Ultimate GPS Breakout を採用した。このモジュールには正確に 1 秒ごとにパルスを発生させる機能を備えている。このパルスの発生時間と GPS 時刻を併用することで、各 MEMS センサの同期を行った。

4. 適用検証

4.1 実験概要

実橋梁計測は、茨城県道 24 号線に架かる、筑波大学学内道路かえで通り内の陸橋である松見橋にて行った。松見橋は全長 31m の箱桁橋である。図2に断面図、図3に平面図を示す。MEMS センサをボックスに入れ、図3に示された赤点の位置に、両面テープを用いて固定した。計測した橋梁振動は、一般車両の通行による交通振動である。

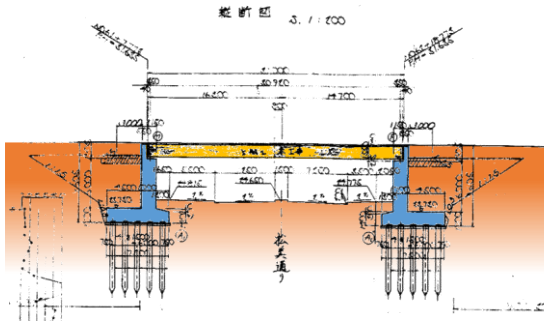


図2 松見橋断面図

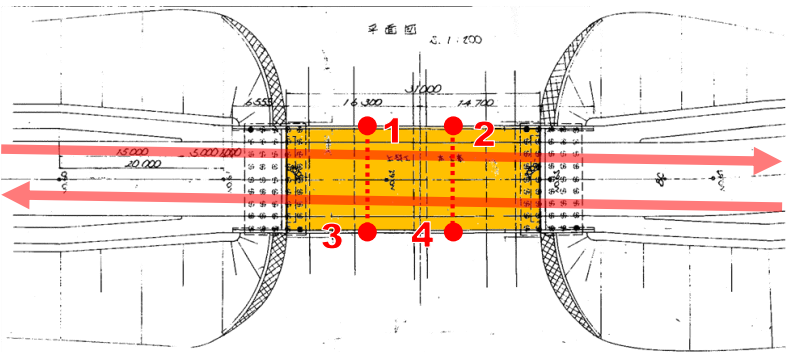


図3 松見橋平面図

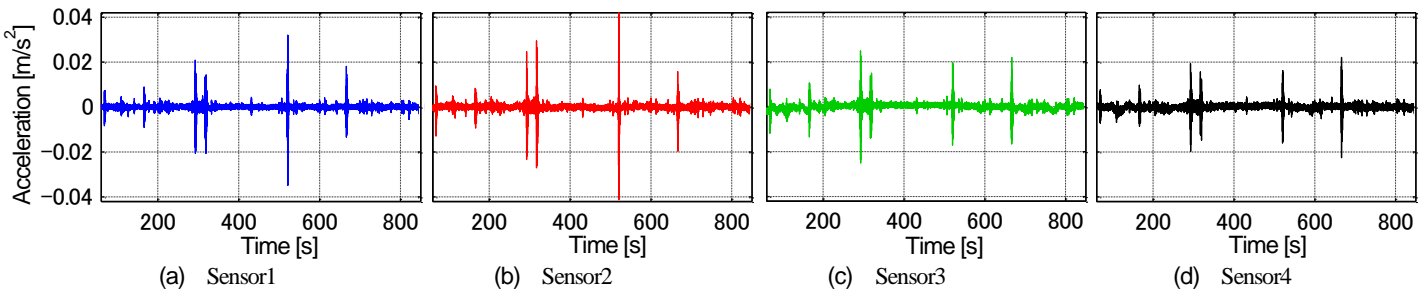
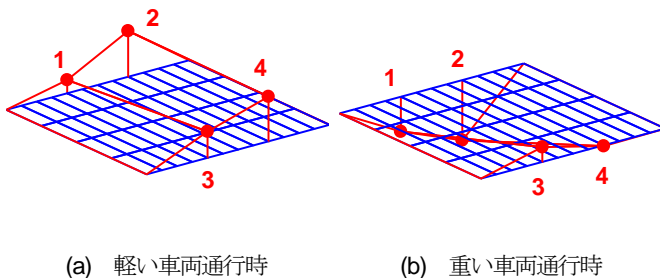
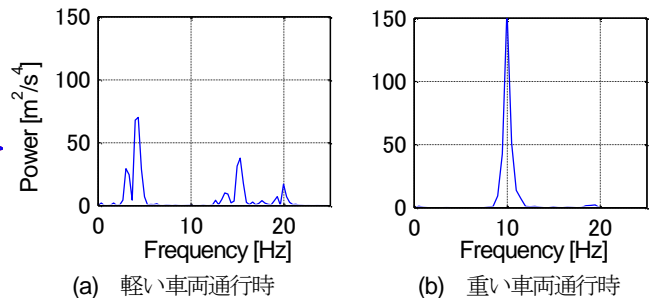


図4 橋梁振動加速度データ



(a) 軽い車両通行時 (b) 重い車両通行時
図5 1次推定モード形状



(a) 軽い車両通行時 (b) 重い車両通行時
図6 1次卓越基準座標スペクトル

4.2 結果

得られた橋梁振動を図4に示す。ピークの現れている部分が車両通行により生じた交通振動である。そのうち、軽い車両が通過した際の振幅の小さいものと、重い車両が通過した際の振幅の大きいものを抽出する。そして、それぞれの振動データに特異値分解を適用し、推定したモード形状を図5に示す。また、推定した1次卓越基準座標に対してフーリエ変換を行ったものを図6に示す。

4.3 考察

図6(a)で現れた4Hz付近の卓越振動数は、橋梁の1次固有振動数と一致している。そのため、軽い車両通行時には、橋梁の影響が強く現れると考える。一方、重い車両の通過時には図6(b)に見られるように10Hzで振動数が卓越し、軽い車両で現れたような橋梁の固有振動数の影響がなかった。これは、荷重が大きいために、車両振動が橋梁振動を決定したと考えられる。この車両振動は路面凹凸により励起されるもので、橋梁の出入り口に存在するジョイント部分によるものと推察する。

通過する車両ごとに、つまり、橋梁にかかる荷重が変化する度に、生じる振動が外力と剛性の関係式から導かれるものと異なった。また、荷重が大きい場合、推定されたモード形状は橋梁損傷

が存在する場合のものに類似した。これらのことから、橋梁の剛性低下が発生している可能性が考えられる。しかし、断定するためには更なる検証が必要である。

謝辞：本研究の一部は、科学研究費助成事業（平成 25～27 年度、若手研究B：25820200）によって実施した。ここに記し謝意を表す。

参考文献

[1] 山本亨輔,大島義信,杉浦邦征,河野広隆：車両応答に基づく橋梁のモード形状推定法 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.67, No.2, pp246, 2011
[2] 山本亨輔,伊勢本遼,大島義信,杉浦邦征：鋼トラス橋の部材破断が橋梁および走行車両の加速度応答に及ぼす影響 構造工学論文集 A, Vol.58A, pp180-193, 2012